

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.

## Position transformation method for numerically controlled machines

Patent Number: DE19507561  
 Publication date: 1995-09-14  
 Inventor(s): SCHMIDT WOLFGANG DR ING (DE); SEEGER GUIDO DR ING (DE)  
 Applicant(s): SIEMENS AG (DE)  
 Requested Patent: ☐ DE19507561  
 Application Number: DE19951007561 19950303  
 Priority Number(s): DE19951007561 19950303; DE19944407928 19940309  
 IPC Classification: B25J9/18; G05B19/4103; B25J19/06  
 EC Classification: G05B19/425  
 Equivalents:

### Abstract

The method involves a change from a base reference to a tool clamp reference interpolation and back again. It establishes a transformation between a tool clamp coordinate system (WZ) in the robot hand (TCP), and a base coordinate system (BA) in the tool piece (W). Mathematical interpolation procedures are applied to the tool clamp reference and then inverted, before the transformation from cartesian to axial coordinates.

Data supplied from theesp@cenet database - I2



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑩ DE 195 07 561 A 1

⑤1 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**B 25 J 9/18**  
G 05 B 19/4103  
B 25 J 19/06

②1 Aktenzeichen: 195 07 561.7  
②2 Anmeldetag: 3. 3. 95  
④3 Offenlegungstag: 14. 9. 95

DE 195 07 561 A 1

③0 Innere Priorität: ③2 ③3 ③1

09.03.94 DE 44 07 928.1

⑦1 Anmelder:

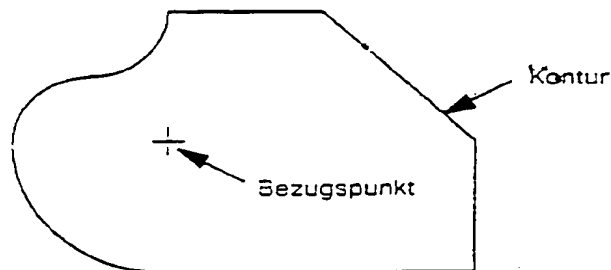
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦2 Erfinder:

Schmidt, Wolfgang, Dr.-Ing., 91315 Höchstadt, DE;  
Seeger, Guido, Dr.-Ing., 91058 Erlangen, DE

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zum Überschleifen bei numerisch gesteuerten Maschinen

⑤7 Ein Verfahren zum Überschleifen bei Wechsel von bahnbezogener auf greiferbezogene Interpolation und umgekehrt, ist so ausgebildet, daß der Ursprung des Greiferkoordinatensystems in den TCP der Roboterhand, das Basiskoordinatensystem in das ortsfeste Werkzeug gelegt wird und daß greiferbezogene CP-Sätze greiferbezogen aufbereitet und interpoliert und vor der Rückwärtstransformation invertiert werden. Damit lassen sich die Übergänge gut beherrschen.



DE 195 07 561 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 07. 95 508 037/633

17/31

## Beschreibung

Bei der numerisch gesteuerten Bearbeitung von Werkstücken durch eine mehrachsige Maschine, z. B. einen Roboter kann es entscheidende technologische Vorteile bringen, wenn gegenüber der herkömmlichen Bearbeitung bei der das Werkzeug von der Roboterhand über ein ortsfestes Werkstück geführt wird, das Werkzeug ortsfest angebracht und das Werkstück von der Roboterhand über das ortsfeste Werkzeug geführt wird. Für die letztgenannte Bearbeitungsart wird durch die Robotersteuerung eine sogenannte greiferbezogene Interpolation vorgenommen, wogegen bei der herkömmlichen Führung des Werkzeuges über ein ortsfestes Werkstück basisbezogen interpoliert wird.

Die greiferbezogene Interpolation bringt dem Anwender mehrere Vorteile, u. a. wird der Aufbau einfacher, man benötigt nur noch einen Greifer und spart die Einspannvorrichtung für das Werkstück, ein ortsfestes Werkzeug unterliegt weniger Beschränkungen in Gewicht und Abmessungen und die Versorgungseinrichtungen für Schweißdraht, Kühlmittel werden deutlich einfacher, da sie nicht über die Roboterarme zugeführt werden müssen. Zweitens erzielt man kürzere Taktzeiten, da man das Werkstück in einem Arbeitsgang ohne Anhalten und Umgreifen heranbringen, bearbeiten und wieder abtransportieren kann.

Diese Vorteile der greiferbezogenen Interpolation kommen insbesondere beim Bahnschweißen und Kleben während einer kontinuierlichen Bahnbewegung zum tragen. Hingegen lassen sich Transportaufgaben vor und nach der Bearbeitung in der Regel einfacher in einem ortsfesten Basiskoordinatensystem durchführen. Für eine optimale Bearbeitung ist es daher wünschenswert, daß zwischen greifer- und basisbezogener Interpolation ständig gewechselt werden kann. Damit bei diesen Wechseln keine ruckartigen Bewegungsabläufe auftreten, müssen die Übergänge zwischen greifer- und basisbezogener Interpolation und umgekehrt weich ausgeführt werden.

Bei der basisbezogenen Interpolation lassen sich weiche Übergänge zwischen zwei Verfahrensätzen durch ein Überschleifverfahren wie es beispielsweise aus der europäischen Patentanmeldung 0449039 (dort mit weiteren Nachweisen) bekannt ist, erzeugen.

Eine flexible Handhabung der Übergänge zwischen basis- und greiferbezogener Interpolation, insbesondere das Überschleifen ist jedoch nicht möglich.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein einfaches Verfahren für den Übergang zwischen greifer- und basisbezogener Interpolation und umgekehrt anzugeben.

Diese Aufgabe wird durch die Merkmale der Patentansprüche gelöst.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird im folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigen:

- Fig. 1 bis Fig. 4 Veranschaulichung der greiferbezogenen Interpolation,
- Fig. 5 die Führung eines an einer Roboterhand angebrachten Werkzeuges über einem ortsfesten Werkstück,
- Fig. 6 die Führung eines an einer Roboterhand angebrachten Werkstücks über einem ortsfesten Werkzeug,
- Fig. 7 ein basisbezogenes Überschleifen mit Wechsel des Bezugssystems,
- Fig. 8 ein Überschleifen bei Übergang auf greiferbezogene Interpolation,
- Fig. 9 ein Überschleifen beim Übergang von greiferbezogener auf basisbezogene Interpolation,
- Fig. 10 Transformation einer Werkzeugposition WZ und der Geschwindigkeitsvektoren  $V$  und  $\omega$  zwischen zwei Koordinatensystemen  $B1$  und  $B2$ ,
- Fig. 11 Transformation der Stützpunkte und Überschleifpunkte,
- Fig. 12 Transformation einer translatorischen Geschwindigkeit zwischen bewegten Koordinatensystemen und
- Fig. 13 Transformation einer Winkelgeschwindigkeit zwischen bewegten Koordinatensystemen.

Bevor auf das eigentliche Überschleifverfahren eingegangen wird, sei anhand der Fig. 1 bis 4 zunächst das Problem der greiferbezogenen Interpolation veranschaulicht.

Die Frage, wie sich die Roboterhand ändern muß, wenn man nicht das Werkzeug sondern das Werkstück führt, aber die gleiche Relativbewegung zwischen beiden erhalten möchte entzieht sich sehr schnell dem Vorstellungsvermögen. An einem einfachen zweidimensionalen Beispiel, wie es anhand der Fig. 1 bis 4 dargestellt ist, lassen sich einige grundsätzliche Eigenheiten gut klarmachen. Fig. 1 zeigt ein Werkstück, dessen Kontur aus geraden Stücken und Kreisabschnitten zusammengesetzt ist. Spannt man dieses Werkstück fest auf, so entspricht die gezeichnete Kontur der Bahn der Werkzeugspitze. Ist das Werkzeug rotationssymmetrisch, läßt sich die Kontur mit einer reinen Translationsbewegung abfahren.

Ein gerichtetes Werkzeug muß dagegen immer eine bestimmte Orientierung zur Kontur einhalten. Die Änderung der Orientierung ist anhand von Fig. 2 durch die an der Kontur angreifenden kleinen Pfeile verdeutlicht. Setzt man das Werkzeug fest und bewegt das Werkstück, zeigen diese beiden Fälle sehr verschiedene Auswirkungen auf die Bewegung der Roboterhand. In Fig. 3 wird das Werkstück von der Roboterhand im Bezugspunkt (= Greifpunkt) gegriffen und es wird die Bewegung dieses Punktes betrachtet, die nötig ist, um die Kontur am feststehenden Werkstück entlang zu führen.

Bei rotationssymmetrischem Werkzeug kann die Orientierung des Werkstücks stets beibehalten werden, lediglich der Kontakt zwischen Kontur und Werkzeug ist sicherzustellen. Die resultierende Bewegung entsteht dann einfach durch Spiegelung der Werkstückkontur in der Mitte der Verbindungslinie zwischen Bezugspunkt und Werkzeug. In diesem Fall läßt sich eine greiferbezogene programmierte Bahn offenbar sehr einfach umrechnen. Man muß nur alle Stützpunkte der Bahn spiegeln und kann Abfolge und Länge der Bahnsegmente unverändert beibehalten.

Ein gerichtetes Werkzeug erfordert dagegen eine Umorientierung des Werkstücks während der Bewegung, und die Überlagerung von Verschiebung und Drehung erzeugt eine sehr viel komplexere Bahn des Greifpunktes, wie sie in Fig. 4 dargestellt ist.

Die Bahn besteht zwar nach wie vor aus geraden Stücken und Kreisabschnitten, deren Anzahl, Verteilung und Länge hat sich aber deutlich geändert. An allen Ecken der Kontur verharret das Werkzeug eine Zeit lang am gleichen Punkt, während das Werkstück um diesen Punkt schwenkt. An Punkt A steht dagegen der Greifer still, ändert lediglich seine Orientierung, während der große Radius des Werkstücks am Werkzeug entlang geführt wird.

Durch Ecken in der Kontur entstehen dieselben Probleme, wie bei basisbezogener Interpolation mit einem räumlich ausgedehnten Werkzeug. Erstens muß ein zusätzliches Bahnsegment eingefügt werden, das lediglich der Umorientierung des Werkstücks dient, zweitens kann diese Umorientierung nicht beliebig schnell erfolgen. Je größer der Abstand zwischen Greifpunkt und Werkzeug, desto weiter wird der Weg, den der Greifer zurückzulegen hat. Da die Bahngeschwindigkeit begrenzt ist, muß hierfür eine ausreichend große Zeitspanne eingeplant werden.

In den gezeigten Beispielen werden gerade Stücken auf gerade Stücke abgebildet und Kreissegmente auf Kreissegmente. Dies liegt jedoch nur an der streng konstant gehaltenen Orientierung des Werkzeugs zur Kontur und kann nicht verallgemeinert werden. Im übrigen ist festzuhalten, daß sich die Geschwindigkeit des Greifers auf den Kreissegmenten durch die Abbildung ändert (am deutlichsten an Ecken). Die technologisch wichtigen Geschwindigkeiten können jetzt nur noch greiferbezogen bestimmt werden und zwar aus der Bewegung des Werkzeugs relativ zum werkstückfesten Koordinatensystem.

Bei der Annäherung an das ortsfeste Werkzeug und nach Ende der Bearbeitung bewegt man das Werkstück sinnvollerweise relativ zu einem ortsfesten Koordinatensystem. Man muß daher zwischen beiden Interpolationsarten schnell und möglichst auch fließend mit Hilfe eines Überschleifsatzes umschalten können.

Anhand der Fig. 5 und 6 werden im folgenden die wesentlichen Grundlagen der Interpolation beschrieben. Fig. 5 zeigt die Führung des Werkzeugs über ein ortsfestes Werkstück. Die Bewegung des an der Roboterhand befestigten Werkzeugs W über ein ortsfest angebrachtes Werkstück S stellt den "Normalfall" dar, der hier kurz rekapituliert werden soll.

Bei einer bekannten Robotersteuerung kann die Bahn des Werkzeugpunktes, dargestellt durch das Koordinatensystem WZ relativ zu einem frei wählbaren werkstückfesten Basiskoordinatensystem BA angegeben werden. Die Steuerung rechnet diese selbständig um und zwar zunächst auf Weltkoordinaten WE (Inertialkoordinaten), dann auf Roboterfußkoordinaten RO, schließlich auf das roboterinterne Koordinatensystem IRO. Daraus wiederum ermittelt die Rücktransformation die einzustellenden Achssollwerte. Vom Programmierer werden also das Basiskoordinatensystem BA relativ zum Inertialkoordinatensystem WE sowie einige ausgezeichnete Bahnpunkte (wobei ein Bahnpunkt jeweils durch Position und Orientierung des Tool-Center-Points also der Roboterhand bestimmt ist) relativ zu dem Basissystem BA. Die Interpolation arbeitet in Basiskoordinaten und ergänzt somit in Echtzeit die fehlenden Bahnpunkte. Jeder Bahnpunkt muß auf Weltkoordinaten BE umgerechnet werden. Die dazu anzuwendende Gleichung erhält man durch Verfolgen der Transformationskette (Gleichung 1)

$$TWZ^{WE} = T_{BA}^{WE} TWZ^{BA} \quad \text{Gl. 1}$$

wobei T eine Transformationsmatrix ist, die die Position und Orientierung beschreibt. Das Ergebnis erlaubt die Berechnung der Achssollwerte gemäß Gleichung 2

$$\Theta = K^{-1}(TWZ^{IRO}) = K^{-1}((T_{RO}^{WE} T_{IRO}^{RO})^{-1} TWZ^{WE}) \quad \text{Gl. 2}$$

wobei  $K^{-1}$  für die Rücktransformation steht.

In Fig. 6 ist die Führung des Werkstücks über einem ortsfesten Werkzeug dargestellt.

In diesem Fall ist das Werkstück S fest mit der Roboterhand verbunden und wird über das stationäre Werkzeug W, z. B. eine Klebedüse oder eine Schweißvorrichtung geführt. Man möchte die Bahn nach wie vor über einen werkstückfesten Koordinatensystem beschreiben und interpolieren. Da aber jetzt das Werkstück bewegt wird, muß sich auch das Bezugssystem mitbewegen.

Eine einfache und universelle Lösung des Problems besteht darin, das Basissystem BA in das ortsfeste Werkzeug W zu legen und die Bahn als die "Bewegung" dieses Basissystems BA relativ zum Greifpunkt d. h. zum Greiferkoordinatensystem auf dem Werkstück S zu definieren. Die Bahn des Werkzeugs W wird also in werkstückfesten Koordinaten beschrieben. Dies läßt sich durch eine Inversion der basisbezogenen Darstellung erreichen. Anstelle von  $TWZ^{BA}$  wird nun  $T_{BA}^{WZ} = (TWZ^{BA})^{-1}$  verwendet. Durch Verfolgen der Transformationskette erhält man Gleichung 3

$$TWZ^{WE} T_{BA}^{WZ} = T_{BA}^{WE} \Rightarrow TWZ^{WE} = T_{BA}^{WE} (T_{BA}^{WZ})^{-1} \quad \text{Gl. 3}$$

Die Position des Greiferkoordinatensystems WZ dargestellt in Weltkoordinaten,  $TWZ^{WE}$ , wird genauso weiterverarbeitet, wie bei basisbezogener Programmierung.

Ist die Bahn in greiferbezogenen Koordinaten angegeben, muß man sie demnach zunächst in diesen Koordinaten interpolieren, was sich nicht von einer Interpolation in einem ortsfesten Basissystem unterscheidet. Das Ergebnis  $T_{BA}^{WZ}$  ist jedoch in jedem Interpolationstakt zu invertieren, noch vor der Umrechnung auf Weltkoordinaten  $TWZ^{WE}$ . Im übrigen sind beide Interpolationsverfahren völlig gleich.

Greiferbezogene PTP-Sätze sind entsprechend zu behandeln. Der Zielpunkt eines solchen Satzes liegt ebenfalls als  $T_{BA}^{WZ}$  vor, wird daher zunächst invertiert, dann in roboterinterne kartesische Koordinaten transformiert und schließlich in Achssollwerte. Hier entsteht nur in der Satzaufbereitung ein geringer Zusatzaufwand, die achsspezifische Interpolation kann unverändert bleiben.

Nach diesen Vorbemerkungen wird nun im folgenden auf das erfindungsgemäße Verfahren eingegangen.

### Satzübergänge und Überschleifen

Die greiferbezogene Interpolation wird stets nur einen Ausschnitt aus einer längeren Bewegungsfolge darstellen. Transportvorgänge vor und nach der Bearbeitung lassen sich in der Regel besser in ortsfesten Koordinaten programmieren und interpolieren. Die Übergänge zwischen basisbezogener und greiferbezogener Interpolation sollten für den Anwender ebenso flexibel zu handhaben sein wie ein Wechsel des ortsfesten Basissystems, insbesondere sollte auch ein Überschleifen möglich sein.

Eine allgemeine Lösung dieses Problems muß folgende Punkte berücksichtigen:

1. Satztyp vor und hinter dem Übergang (PTP, CP wie LIN, CIRC),
2. Wechsel der ortsfesten Basis,
3. Übergang von basis- auf greiferbezogene Interpolation oder umgekehrt.

Für jeden der genannten Fälle ist festzulegen:

1. Art des Überschleifsatzes (PTP oder CP),
2. Bezugssystem des Überschleifsatzes,
3. Bestimmung von Beginn und Ende des Überschleifsatzes,
4. Beschaffung und Transformation der Randbedingungen,
5. Synchronisation zwischen Präparation und Interpolation,
6. Behandlung von Lücken und Relativbewegungen,
7. Auswirkung auf Technologiefunktionen (z. B. SYNACT).

Die meisten Änderungen fallen in der Bewegungsplanung an, und zwar bei der Anpassung der Start- und Zielpunkte der Einzel- und Zwischensätze.

### Basisbezogenes Überschleifen

Zur Verdeutlichung wird die Aufbereitung eines gewöhnlichen Satzübergangs vom Typ LIN-LIN, mit Wechsel des ortsfesten Bezugssystems, kurz rekapituliert (Fig. 7). Der letzte noch im alten Bezugssystem B1 programmierte Bewegungssatz (P1 — P2) sei mit "Vorgängersatz" bezeichnet, der anschließende, dessen Zielpunkt P3 im System B2 definiert ist, mit "Folgesatz".

Der Übergang auf den Folgesatz erfordert:

1. Erkennung des Bezugssystem-Wechsels,
2. Transformation des Startpunktes des Folgesatzes (P2) in das neue Bezugssystem,
3. Aufbereitung des Folgesatzes (als Einzelsatz),
4. Bestimmung des Überschleif-Beginns im Vorgängersatz anhand des programmierten Überschleifkriteriums (in Fig. 7) das Wegkriterium \$APO.DIS),
5. Berechnung der Position und Geschwindigkeit (translatorisch und rotatorisch) zu Beginn des Überschleifens (W1, zunächst im Bezugssystem B1),
6. Transformation von Position und Geschwindigkeiten in das Bezugssystem B2,
7. Bestimmung des Überschleif-Endes anhand des Überschleif-Beginns und einer Weg-Zeit-Symmetriebedingung,
8. Berechnung der Position und Geschwindigkeiten am Ende des Überschleifens (im Bezugssystem B2),
9. Aufbereitung des Überschleifsatzes im Bezugssystem B2.

Wie die folgenden Abschnitte zeigen werden, kommt man bei einem Übergang auf greiferbezogene Interpolation oder umgekehrt mit wenigen Erweiterungen aus, die im wesentlichen die Transformation der Stützpunkte betreffen.

### Übergang von basisbezogener auf greiferbezogene Interpolation

Der qualitative Ablauf der Satzaufbereitung läßt sich anhand eines einfachen Beispiels diskutieren, bei dem die Orientierung des Greifers konstant bleibt (Fig. 8). Die Annahme konstanter Orientierung dient nur der besseren Übersicht bei der zeichnerischen Darstellung, die nachfolgend beschriebenen Algorithmen gelten auch ohne diese Einschränkung.

Programmiert seien die Punkte P1, P2 und P3 sowie ein Überschleifkriterium, durch das der Beginn des Überschleifens W1 festgelegt ist. Da jeder Satz durch die Angabe seines Zielpunktes definiert wird, ist der Punkt P2, an dem der Übergang stattfindet, noch in einem ortsfesten Koordinatensystem programmiert. Sollte die Bearbeitungsaufgabe es nicht zulassen, daß im Folgesatz (P2 — P3) sofort eine Bearbeitung stattfindet, muß der Anwender den Beginn der Kontur durch einen weiteren, greiferbezogenen Punkt P3' definieren. Am prinzipiellen Ablauf ändert sich dadurch nichts.

Die greiferbezogene Interpolation zwingt dem Bezugssystem BA (\$BASE) eine bestimmte Lage auf, nämlich im ortsfesten Werkzeug. Da die Annäherung möglicherweise in einem anderen Bezugssystem einfacher zu programmieren ist, wird der allgemeine Fall betrachtet, daß beim Übergang auf greiferbezogene Interpolation

gleichzeitig das Bezugssystem gewechselt wird (durch Zuweisung eines neuen Wertes an \$BASE). Start- und Zielpunkt des Vorgängersatzes sowie der Beginn des Überschleifens (P1, P2 und W1) sind somit zunächst einmal im ortsfesten Bezugssystem BEZ bekannt. Der Zielpunkt P3 des Folgesatzes definiert dagegen die Position des Bezugssystems BA relativ zum Greiferkoordinatensystem WZ.

Für die weitere Diskussion muß man sich noch einmal klarmachen, daß der Übergang zur greiferbezogenen Interpolation einen Wechsel auf eine andere Sichtweise der "Bahn" darstellt: anstelle der Bahn des Greifers im ortsfesten Bezugssystem wird nun die Bahn des Werkzeugs (Bezugssystem BA) im Greiferkoordinatensystem beschrieben. Beide Blickwinkel existieren völlig gleichberechtigt nebeneinander, zu jedem Zeitpunkt kann man sowohl die eine als auch die andere Bahn angeben und Bahnpunkte ineinander umrechnen. Selbstverständlich bleibt auch der Greifer an Punkt P2 nicht stehen, sondern bewegt sich wie angedeutet nach links unten weiter. Die "Bahn des Greifers aus Sicht des Werkzeugs" ist so eingezeichnet, wie sie ein ortsfester Beobachter sehen würde.

Ein auf dem Greifer sitzender Beobachter würde dagegen feststellen, wie das Werkzeug sich an die Kontur annähert, in Richtung auf P3 schwenkt und an der Kontur entlangfährt, dargestellt als "Bahn des Werkzeugs aus Sicht des Greifers". Da für das Beispiel konstante Orientierung vorausgesetzt wurde, läßt sich diese Bahn sehr einfach durch Punktspiegelung konstruieren (vgl. oben). Beide Bahndarstellungen sind für sich genommen stetig.

Verbindet man beide Einzelsätze ohne Überschleifen, erfolgt der Übergang im Stillstand genau zu dem Zeitpunkt an dem der Greifer den Punkt P2 erreicht. Fügt man dagegen einen Überschleifensatz ein, kann man sowohl zu Beginn als auch am Ende des Überschleifens umschalten, wobei an dieser Stelle nicht nur die Position, sondern auch die Geschwindigkeiten zu transformieren sind.

Zugunsten einer möglichst einheitlichen Behandlung aller Überschleifvorgänge sollte der Zwischensatz bereits im Koordinatensystem des Folgesatzes präpariert und interpoliert werden, d. h. der Übergang erfolgt bereits zu Beginn des Überschleifens, am Punkt W1 bzw. B1. Eine Ausnahme von dieser Regel machen nur PTP-CP-Überschleifensätze, da diese grundsätzlich achsspezifisch aufbereitet werden müssen.

Die relativ einfache zeichnerische Darstellung darf nicht zu der Annahme verleiten, daß ein Überschleifvorgang, der basisbezogen als LIN-LIN-Übergang behandelt werden kann, auch in greiferbezogenen Koordinaten diese einfache Form hat. Nur im Sonderfall konstanter Orientierung werden Geradenstücke immer auf Geradenstücke abgebildet. Demnach muß ein greiferbezogen aufbereiteter Überschleifvorgang in der Regel aus zwei Parabelabschnitten zusammengesetzt werden, um Stetigkeit aller skalaren und vektoriellen Geschwindigkeiten zu gewährleisten.

Die nachfolgend qualitativ angegebenen Algorithmen stimmen mit den basisbezogenen, bereits vorhandenen Versionen über weite Strecken überein.

#### Aufbereitung CP-CP

Dieser Fall entspricht weitgehend der Skizze in Fig. 8. Folgesatz und Überschleifensatz müssen greiferbezogen (relativ zum Greiferkoordinatensystem WZ) aufbereitet werden. Alle fehlenden Stützpunkte und Geschwindigkeiten sind durch Frame-Umrechnung zu beschaffen.

1. Zielpunkt des Folgesatzes als greiferbezogen erkennen.
2. Startpunkt des Folgesatzes auf Greiferkoordinaten umrechnen:
  - a) Position von Bezugssystem BEZ in Bezugssystem BA transformieren,
  - b) Ergebnis invertieren.
3. Folgesatz greiferbezogen aufbereiten.
4. Beginn des Überschleifens im Vorgängersatz berechnen und transformieren:
  - a) Überschleifkriterium auswerten, Position und Geschwindigkeiten berechnen (W1 relativ zu BEZ),
  - b) ins Bezugssystem BA transformieren.
  - c) Ergebnis invertieren.
5. Ende des Überschleifens berechnen:
  - a) Überschleifkriterium greiferbezogen auswerten. Position und Geschwindigkeiten berechnen (B2 relativ zu WZ).
6. Überschleifensatz greiferbezogen aufbereiten.

#### Aufbereitung PTP-PTP

Hier ist der Zielpunkt des Folgesatzes in kartesischen Koordinaten, bezogen auf den Greifer, gegeben. Ziel der Umrechnungen ist jedoch ein achsspezifischer Folgesatz und Überschleifensatz.

1. Zielpunkt des Folgesatzes als greiferbezogen erkennen.
2. Zielpunkt des Folgesatzes auf achsspezifische Koordinaten umrechnen:
  - a) Zielpunkt invertieren (ergibt Darstellung relativ zu BA),
  - b) Ergebnis in roboterinterne Koordinaten transformieren ( $BA \rightarrow IRO$ ),
  - c) sowie in achsspezifische Darstellung umrechnen (Rücktransformation).
3. Folgesatz achsspezifisch aufbereiten.
4. Beginn des Überschleifens im Vorgängersatz berechnen:
  - a) Überschleifkriterium achsspezifisch auswerten. Position und Geschwindigkeiten berechnen.
5. Ende des Überschleifens berechnen:
  - a) Überschleifkriterium achsspezifisch auswerten, Position und Geschwindigkeiten berechnen.

## 6. Überschleifsatze achsspezifisch aufbereiten.

Der Startpunkt des Folgesatzes bedarf in diesem Fall keiner weiteren Bearbeitung, da er bei Aufbereitung des PTP-Vorgängersatzes bereits in achsspezifische Koordinaten umgerechnet wurde.

## Aufbereitung CP-PTP

Wie im Fall PTP-PTP ist der Zielpunkt des Folgesatzes in kartesischen Koordinaten, bezogen auf den Greifer, programmiert. Berechnet werden soll ein achsspezifischer Folgesatz und Überschleifsatze. Der Startpunkt des Folgesatzes ist in einem ortsfesten Koordinatensystem gegeben.

1. Zielpunkt des Folgesatzes als greiferbezogen erkennen.
2. Start- und Zielpunkt des Folgesatzes auf achsspezifische Koordinaten umrechnen:
  - a) Startpunkt aus dem ortsfesten Bezugssystem in roboterinterne Koordinaten transformieren (BEZ  $\rightarrow$  IRO),
  - b) und in achsspezifische Darstellung umrechnen (Rücktransformation).
  - c) Zielpunkt invertieren (ergibt Darstellung relativ zu BA),
  - d) Ergebnis in roboterinterne Koordinaten transformieren (BA  $\rightarrow$  IRO),
  - e) sowie in achsspezifische Darstellung umrechnen (Rücktransformation).
3. Folgesatz achsspezifisch aufbereiten.
4. Beginn des Überschleifens berechnen:
  - a) Überschleifkriterium basisbezogen auswerten, zugehörige Position berechnen (W1 relativ zu BEZ), außerdem leicht verschobene, benachbarte Position.
  - b) in roboterinterne Koordinaten transformieren (BEZ  $\rightarrow$  IRO),
  - c) sowie in achsspezifische Darstellung umrechnen (Rücktransformation),
  - d) Mit Hilfe der zweiten Position achsspezifische Geschwindigkeiten bestimmen (numerische Differentiation).
5. Ende des Überschleifens im Folgesatz berechnen: Überschleifkriterium achsspezifisch auswerten. Position und Geschwindigkeiten berechnen.
6. Überschleifsatze achsspezifisch aufbereiten.

## Aufbereitung PTP-CP

Hier ist der Folgesatz greiferbezogen, der Überschleifsatze achsspezifisch aufzubereiten. Der Zielpunkt des Vorgängersatzes, also der Startpunkt des Folgesatzes, liegt mindestens in achsspezifischen Koordinaten vor. Die einzelnen Arbeitsschritte:

1. Zielpunkt des Folgesatzes als greiferbezogen erkennen.
2. Startpunkt des Folgesatzes auf Greiferkkoordinaten umrechnen:
  - a) Achsspezifische Darstellung in roboterinterne kartesische Koordinaten transformieren (IRO), oder programmierte kartesische Darstellung verwenden, sofern vorhanden.
  - b) in das neue Bezugssystem umrechnen (IRO  $\rightarrow$  BA bzw. BEZ  $\rightarrow$  BA),
  - c) Ergebnis invertieren.
3. Folgesatz greiferbezogen aufbereiten.
4. Beginn des Überschleifens im Vorgängersatz berechnen: Überschleifkriterium achsspezifisch auswerten, Position und Geschwindigkeiten berechnen.
5. Ende des Überschleifens berechnen:
  - a) Überschleifkriterium greiferbezogen auswerten, zugehörige Position berechnen (B2 relativ zu WZ), außerdem leicht verschobene, benachbarte Position.
  - b) Beide Positionen invertieren (ergibt Darstellung relativ zu BA),
  - c) in roboterinterne Koordinaten transformieren (BA  $\rightarrow$  IRO),
  - d) sowie in achsspezifische Darstellung umrechnen (Rücktransformation)
  - e) Mit Hilfe der zweiten Position achsspezifische Geschwindigkeiten bestimmen (numerische Differentiation).
6. Überschleifsatze achsspezifisch aufbereiten.

Der Übergang von greiferbezogener auf basisbezogene Interpolation wird anhand von Fig. 9 erläutert.

Wieder wird zugunsten einer einfacheren zeichnerischen Darstellung eine konstante Orientierung zugrunde gelegt; die Algorithmen gelten jedoch allgemein. Man kann sich vorstellen, daß der in Fig. 8 eingeleitete Bearbeitungsvorgang nach einmaliger Umrundung des Werkstücks beendet ist und nahtlos in einen basisbezogen programmierten Abtransport übergeht (Fig. 9).

Programmiert sind wieder die Punkte P1, P2 und P3 sowie ein Überschleifkriterium, das den Beginn des Überschleifens, B1, festlegt. Der Abschnitt P1—P2 ist offenbar noch greiferbezogen angegeben, der Folgesatz, durch den Zielpunkt P3 definiert, dagegen relativ zu einem ortsfesten Bezugssystem BEZ, das nicht mit dem werkzeugfesten System BA übereinstimmen muß.

Wieder enthält die Skizze sowohl die Bahn des Werkzeugs aus der Sicht eines Beobachters auf dem Greifer als auch die Bahn des Greifers, wie sie in einem ortsfesten Koordinatensystem erscheint. Der Startpunkt für den Folgesatz muß anhand des greiferbezogen programmierten Zielpunktes des Vorgängersatzes berechnet wer-



den. Der Beginn des Überschleifens ist ebenfalls noch in greiferfesten Koordinaten definiert, der Überschleifensatz selbst wird jedoch nach Möglichkeit im Bezugssystem des Folgesatzes aufbereitet, also entweder basisbezogen oder achsspezifisch. Demnach müssen die Positionen  $W_0$ ,  $W_1$  und  $W_2$  sowie die Geschwindigkeiten an den Punkten  $W_1$  und  $W_2$  im Bezugssystem BEZ oder im achsspezifischen Koordinatensystem bestimmt werden.

Die nachfolgend qualitativ angegebenen Algorithmen für die Rückkehr zur basisbezogenen Bewegung stimmen weitgehend mit den ausschließlich basisbezogenen, bereits vorhandenen Versionen überein. Die Unterschiede sind durch Grautönung hervorgehoben.

#### CP-CP

Dieser Fall ist in der Skizze, **Bild 12**, dargestellt. Folgesatz und Überschleifensatz sollen basisbezogen, d. h. im Koordinatensystem BEZ, aufbereitet werden. Dies erfordert die folgenden Arbeitsschritte:

1. Zielpunkt des Folgesatzes als basisbezogen erkennen.
2. Startpunkt des Folgesatzes umrechnen:
  - a) Startpunkt invertieren (ergibt  $W_0$  relativ zu BA)
  - b) und in das neue Bezugssystem transformieren ( $BA \rightarrow BEZ$ ).
3. Folgesatz basisbezogen aufbereiten.
4. Beginn des Überschleifens im Vorgängersatz berechnen und transformieren:
  - a) Überschleifkriterium greiferbezogen auswerten, Position und Geschwindigkeiten berechnen ( $B_1$  relativ zu  $W_2$ ).
  - b) Ergebnis invertieren (ergibt  $W_1$  relativ zu BA),
  - c) und ins Bezugssystem BEZ transformieren ( $BA \rightarrow BEZ$ ).
5. Ende des Überschleifens berechnen:
  - Überschleifkriterium basisbezogen auswerten. Position und Geschwindigkeiten berechnen ( $W_2$  relativ zu BEZ).
6. Überschleifensatz basisbezogen aufbereiten.

#### PTP-PTP

Dies ist der einfachste Fall, da er sich überhaupt nicht von einem gewöhnlichen PTP-PTP-Übergang mit Überschleifen und Basiswechsel unterscheidet. Der Zielpunkt des Vorgängersatzes ist relativ zum greiferfesten Koordinatensystem angegeben, aber von der Bewegungsplanung bereits auf achsspezifische Darstellung umgerechnet worden. Der Zielpunkt des Folgesatzes liegt in ortsfesten kartesischen oder in achsspezifischen Koordinaten vor. Folgesatz und Überschleifensatz sind achsspezifisch aufzubereiten.

1. Zielpunkt des Folgesatzes als basisbezogen oder achsspezifisch erkennen.
2. Zielpunkt des Folgesatzes auf achsspezifische Koordinaten umrechnen:
  - a) Gegebene kartesische Position in roboterinterne Koordinaten transformieren ( $BEZ \rightarrow IRO$ ).
  - b) sowie in achsspezifische Darstellung umrechnen (Rücktransformation).
3. Folgesatz achsspezifisch aufbereiten.
4. Beginn des Überschleifens im Vorgängersatz berechnen:
  - Überschleifkriterium achsspezifisch auswerten. Position und Geschwindigkeiten berechnen.
5. Ende des Überschleifens berechnen:
  - Überschleifkriterium achsspezifisch auswerten, Position und Geschwindigkeiten berechnen.
6. Überschleifensatz achsspezifisch aufbereiten.

#### CP-PTP

Wieder liegt der Zielpunkt des Folgesatzes in ortsfesten Koordinaten oder sogar achsspezifisch vor. Sein Startpunkt muß allerdings daran angepaßt werden. Der Überschleifensatz wird wie bei allen PTP-CP- und CP-PTP-Übergängen achsspezifisch berechnet.

1. Zielpunkt des Folgesatzes als basisbezogen oder achsspezifisch erkennen.
2. Start- und Zielpunkt des Folgesatzes auf achsspezifische Koordinaten umrechnen:
  - a) Startpunkt invertieren (ergibt  $W_0$  relativ zu BA),
  - b) in roboterinterne Koordinaten transformieren ( $BEZ \rightarrow IRO$ ),
  - c) und in achsspezifische Darstellung umrechnen (Rücktransformation).
  - d) Zielpunkt in roboterinterne Koordinaten transformieren ( $BEZ \rightarrow IRO$ ),
  - e) sowie in achsspezifische Darstellung umrechnen (Rücktransformation).
3. Folgesatz achsspezifisch aufbereiten.
4. Beginn des Überschleifens berechnen:
  - a) Überschleifkriterium greiferbezogen auswerten, zugehörige Position berechnen ( $B_1$  relativ zu  $W_2$ ), außerdem leicht verschobene, benachbarte Position.
  - b) Beide Positionen invertieren (ergibt  $W_1$  relativ zu BA),
  - c) in roboterinterne Koordinaten transformieren ( $BA \rightarrow IRO$ ),
  - d) sowie in achsspezifische Darstellung umrechnen (Rücktransformation).
- e) Mit Hilfe der zweiten Position achsspezifische Geschwindigkeiten bestimmen (numerische Differentia-

tion).

5. Ende des Überschleifens im Folgesatz berechnen:

Überschleifkriterium achsspezifisch auswerten, Position und Geschwindigkeiten berechnen.

6. Überschleifensatz achsspezifisch aufbereiten.

5

#### PTP-CP

In diesem Fall ist der Zielpunkt des Vorgängersatzes greiferbezogen programmiert und wurde bereits auf achsspezifische Koordinaten umgerechnet. Der Startpunkt des basisbezogenen Folgesatzes kann also auf zwei Wegen gewonnen werden. Nur bei Verwendung der greiferbezogenen Angabe unterscheidet sich die Vorgehensweise von einem gewöhnlichen PTP-CP-Übergang.

1. Zielpunkt des Folgesatzes als basisbezogen erkennen.
2. Startpunkt des Folgesatzes umrechnen (Möglichkeit 1):
  - a) Startpunkt invertieren (ergibt  $W_0$  relativ zu BA)
  - b) und in das neue Bezugssystem transformieren ( $BA \rightarrow BEZ$ ).
2. Startpunkt des Folgesatzes umrechnen (Möglichkeit 2):
  - a) Achsspezifische Darstellung in roboterinterne kartesische Koordinaten transformieren (IRO),
  - b) in das neue Bezugssystem umrechnen (IRO  $\rightarrow$  BEZ).
3. Folgesatz basisbezogen aufbereiten.
4. Beginn des Überschleifens im Vorgängersatz berechnen:
- Überschleifkriterium achsspezifisch auswerten, Position und Geschwindigkeiten berechnen.
5. Ende des Überschleifens berechnen:
  - a) Überschleifkriterium basisbezogen auswerten, zugehörige Position berechnen ( $W_2$  relativ zu BEZ), außerdem leicht verschobene, benachbarte Position.
  - b) in roboterinterne Koordinaten (IRO) transformieren,
  - c) sowie in achsspezifische Darstellung umrechnen (Rücktransformation).
  - d) Mit Hilfe der zweiten Position achsspezifische Geschwindigkeiten bestimmen (numerische Differentiation).
6. Überschleifensatz achsspezifisch aufbereiten.

30

#### Mathematische Formulierung der Positions- und Geschwindigkeitstransformationen

Im derzeitigen Ausbaustand der Steuerung sind nur Koordinatentransformationen zwischen ortsfesten Bezugssystemen vorgesehen. Die greiferbezogene Interpolation erfordert jedoch auch Umrechnungen zwischen Koordinatensystemen, die sich relativ zueinander bewegen. Bei Positionen (dargestellt als homogene Matrizen) bringt dies nichts Neues, abgesehen von der Tatsache, daß alle Transformationsgleichungen nur noch momentan gelten, also in jedem Interpolationstakt neu ausgewertet werden müssen.

Für differenzierte Größen, also zum Beispiel die translatorischen Geschwindigkeiten, gelten zwischen bewegten Koordinatensystemen völlig andere, aufwendigere Transformationsgleichungen. Dies muß bei der Umrechnung der Randbedingungen von greiferbezogenen Überschleifensätzen berücksichtigt werden. Hier sind Position, translatorische Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit zu transformieren. Die Gleichungen dafür werden im folgenden aufgestellt.

Zur Verdeutlichung seien die Transformationsgleichungen für ortsfeste Koordinatensysteme kurz wiederholt. Fig. 10 zeigt zwei Bezugskoordinatensysteme  $B_1$  und  $B_2$  und eine beliebige Position, dargestellt durch den Ursprung und die Orientierung eines Koordinatensystems  $WZ$ , das sich mit der Geschwindigkeit  $\underline{v}$  verschiebt und mit der Winkelgeschwindigkeit  $\underline{\omega}$  dreht.

Die Lage der drei Koordinatensysteme relativ zueinander läßt sich sehr einfach durch homogene Transformationen beschreiben, die in Fig. 10 ebenfalls angegeben sind. So beschreibt  $T_{WZ}^{B_2}$  die Lage von  $WZ$  relativ zu  $B_2$ . Ist außerdem die Lage von  $B_2$  relativ zu  $B_1$  bekannt,  $T_{B_2}^{B_1}$ , erhält man für die Transformation der Position  $WZ$  in das Bezugskoordinatensystem  $B_1$  die bekannte Gleichung

$$T_{WZ}^{B_1} = T_{B_2}^{B_1} T_{WZ}^{B_2} = (T_{B_1}^{B_2})^{-1} T_{WZ}^{B_2}$$

Dabei werden in einem Schritt die Richtungen aller Koordinatenachsen von  $WZ$  und die Lage des Ursprungs von  $WZ$  in das neue Bezugssystem umgerechnet.

Die Geschwindigkeitsvektoren  $\underline{v}$  und  $\underline{\omega}$  sind Richtungsvektoren, d. h. sie sind nicht an einen bestimmten Punkt gebunden, nur ihre Richtung interessiert. Daher spielt bei der Transformation in ein anderes ortsfestes Koordinatensystem nur dessen geänderte Orientierung eine Rolle, die Lage seines Ursprungs bleibt unberücksichtigt. Ist zum Beispiel die translatorische Geschwindigkeit von  $WZ$  relativ zu  $B_2$  gegeben,  $\underline{v}^{B_2}$ , so berechnet man die Darstellung relativ zu  $B_1$  gemäß

$$\underline{v}^{B_1} = \underline{R}_{B_2}^{B_1} \underline{v}^{B_2} = (\underline{R}_{B_1}^{B_2})^{-1} \underline{v}^{B_2}$$

Entsprechend gilt für die Winkelgeschwindigkeit

$$\underline{\omega}^{B_1} = \underline{R}_{B_2}^{B_1} \underline{\omega}^{B_2} = (\underline{R}_{B_1}^{B_2})^{-1} \underline{\omega}^{B_2}$$

Darin bezeichnet  $\underline{R}_{B2}^{B1}$  den Teil von  $T_{B2}^{B1}$ , der die Orientierung von B2 relativ zu B1 angibt:

$$T_{B2}^{B1} = \begin{bmatrix} \underline{R}_{B2}^{B1} & \underline{p}_{B2}^{B1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

#### Transformation der programmierten Stützpunkte und Überschleifpunkte

Bei jedem Wechsel von einem basisbezogenen in das greiferbezogene Koordinatensystem und umgekehrt muß der Zielpunkt des Vorgängersatzes in das Koordinatensystem des Folgesatzes transformiert werden. Der Beginn von Überschleifvorgängen zwischen CP-Sätzen ist ebenfalls zu transformieren (Position, translatorische Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit).

Fig. 11 zeigt die Situation beim Eintritt in einen CP-CP-Überschleifsatz. Programmiert war der Zielpunkt W0, der bereits auf das Bezugssystem BA umgerechnet sei (mit Hilfe der Gleichungen für die Transformation zwischen ortsfesten Koordinatensystemen). Die Position  $T_{W0}^{BA}$  liegt also vor. Durch Auswertung des Überschleifkriteriums erhält man ferner die Position zu Beginn des Überschleifens, W1. Lage und Orientierung an dieser Stelle seien ebenfalls bereits auf das Bezugssystem BA umgerechnet, man kennt also  $T_{W1}^{BA}$  (Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit behandeln wir später).

Benötigt werden der Startpunkt und der Beginn des Überschleifens relativ zum Greiferkoordinatensystem, also  $T_{B0}^{WZ}$  und  $T_{B1}^{WZ}$ .

Die Skizze zeigt den Zeitpunkt  $\tau_0$ , zu dem das Greiferkoordinatensystem WZ die Position W0 erreicht.  $WZ(\tau_0) = W0$ . Gleichzeitig liegt vom Greifer aus gesehen das Basissystem BA an der Stelle B0,  $BA(\tau_0) = B0$ . Demnach gilt

$$T_{B0}^{WZ} = T_{BA}^{WZ}(\tau_0) = (T_{W0}^{BA}(\tau_0))^{-1} = (T_{W0}^{BA})^{-1}$$

wie man aus der Skizze auch sofort abliest.

Zu Beginn des Überschleifens gilt entsprechend  $WZ(\tau_1) = W1$  und  $BA(\tau_1) = B1$ , also

$$T_{B1}^{WZ} = T_{BA}^{WZ}(\tau_1) = (T_{W1}^{BA}(\tau_1))^{-1} = (T_{W1}^{BA})^{-1}$$

Dies mag bei einem Blick auf die Skizze nicht unmittelbar einleuchten. Man muß sich jedoch klarmachen, daß die Bahn des Basissystems BA aus Sicht des Greifers zu jedem Zeitpunkt die Bedingung  $T_{BA}^{WZ} = (T_{WZ}^{BA})^{-1}$  erfüllt, dies ist gerade die Vorschrift, anhand derer die Bahn gezeichnet wurde. Man kann sich vorstellen, daß zum Zeitpunkt  $\tau_1$  das Greiferkoordinatensystem WZ gerade bei W1 liegt und das Basissystem BA unter genau dem Blickwinkel sieht, der dann zum späteren Zeitpunkt  $\tau_0$ , etwas verschoben, eingezeichnet wurde (als B1 relativ zu WZ).

#### Transformation der Geschwindigkeiten

Zur Ableitung der Transformationsgleichungen dient Fig. 12. Der Unterschied zu Fig. 10 besteht darin, daß sich der Ursprung des Koordinatensystems B2 mit einer Geschwindigkeit  $\underline{v}_{B2}$  relativ zu B1 bewegt und daß sich das System mit einer Winkelgeschwindigkeit  $\underline{\omega}_{B2}$  dreht (um eine Drehachse durch seinen Ursprung). Diese beiden Geschwindigkeiten kann man auch durch eine zeitlich veränderliche Transformation  $T_{B2}^{B1}$  ausdrücken.

Vereinfachend betrachten wir jetzt nicht ein Koordinatensystem WZ, sondern nur einen Punkt P, der sich mit einer Geschwindigkeit  $\underline{v}_P$  relativ zu B2 bewegt. Diese Geschwindigkeit sei in B2-Koordinaten bekannt, gesucht ist die Angabe in B1-Koordinaten.

$$\underline{v}_P^{B1} = f(\underline{v}_P^{B2}).$$

Ausgehend von der Gleichung für die Koordinatentransformation des Punktes P, die zu jedem Zeitpunkt gilt.

$$\underline{x}_P^{B1} = T_{B2}^{B1} \underline{x}_P^{B2}, \quad \underline{x}_P^{B1} = [(\underline{r}_{P,B1})^T, 1]^T,$$

erhält man durch Differentiation nach der Zeit und nach einigen Umformungen [1]

$$\underline{v}_P^{B1} = \underline{v}_{B2}^{B1} + \underline{\omega}_{B2}^{B1} \times \underline{r}_{P,B2}^{B1} + \underline{R}_{B2}^{B1} \underline{v}_P^{B2},$$

was auch als "Satz von Coriolis" bekannt ist.

Durch Anwendung dieses allgemeinen Ergebnisses auf einen speziellen Punkt, nämlich den Ursprung von B1, folgt die benötigte Vorschrift für die "Inversion" der translatorischen Geschwindigkeiten. Dazu ersetzt man alle Indizes P durch B1, so daß folgt

$$\underline{v}_{B1}^{B1} = \underline{v}_{B2}^{B1} + \underline{\omega}_{B2}^{B1} \times \underline{r}_{B1,B2}^{B1} + \underline{R}_{B2}^{B1} \underline{v}_{B1}^{B2},$$

Die Geschwindigkeit des Ursprungs von B1 in Koordinaten von B1,  $\underline{v}_{B1}^{B1}$ , ist Null. Schreibt man nun BA statt B1 und WZ statt B2, erhält man

$$0 = \underline{v}_{WZ}^{BA} + \underline{\omega}_{WZ}^{BA} \times \underline{r}_{BA,WZ}^{BA} + \underline{R}_{WZ}^{BA} \underline{v}_{BA}^{WZ},$$

und nach der Geschwindigkeit des Ursprungs des Basissystems relativ zum Greiferkoordinatensystem aufgelöst

$$\underline{v}_{BA}^{WZ} = -(\underline{R}_{WZ}^{BA})^{-1} (\underline{v}_{WZ}^{BA} + \underline{\omega}_{WZ}^{BA} \times \underline{r}_{BA,WZ}^{BA}).$$

Diese Gleichung erlaubt die Berechnung greiferbezogener translatorischer Geschwindigkeiten aus basisbezogenen Positionen und Geschwindigkeiten, wird also beim Überschiefen von basisbezogenen auf greiferbezogene Sätze benötigt. Im einzelnen geht man aus von

1.  $\underline{R}_{WZ}^{BA}$  Rotationsmatrix in  $\underline{T}_{WZ}^{BA}(\tau_1)$ , zu Beginn des Überschiefens

2.  $\underline{r}_{BA,WZ}^{BA}$  Vektor vom Ursprung von WZ zum Ursprung von BA, ausgedrückt in Koordinaten von BA

3.  $\underline{v}_{WZ}^{BA}$  Geschwindigkeit des Greiferkoordinatensystems zu Beginn des Überschiefens, relativ zu BA, ausgedrückt in Koordinaten von BA

4.  $\underline{\omega}_{WZ}^{BA}$  Winkelgeschwindigkeit des Greiferkoordinatensystems zu Beginn des Überschiefens, relativ zu BA, in Koordinaten von BA

und erhält

5.  $\underline{v}_{BA}^{WZ}$  Geschwindigkeit des Basissystems zu Beginn des Überschiefens, relativ zum Greifer (WZ), ausgedrückt in Koordinaten von WZ.

Die umgekehrte Umrechnung für den Übergang von greiferbezogener auf basisbezogene Interpolation erhält man am einfachsten durch formale Vertauschung der Indizes WZ und BA:

$$\underline{v}_{WZ}^{BA} = -(\underline{R}_{BA}^{WZ})^{-1} (\underline{v}_{BA}^{WZ} + \underline{\omega}_{BA}^{WZ} \times \underline{r}_{WZ,BA}^{WZ}).$$

#### Transformation der Winkelgeschwindigkeiten

Die Transformation von Winkelgeschwindigkeiten gestaltet sich wesentlich einfacher, da Winkelgeschwindigkeitsvektoren sich ohne Rücksicht auf translatorische Geschwindigkeiten stets vektoriell addieren lassen. Man denke sich zwei Koordinatensysteme B1 und B2, die sich relativ zu einem feststehenden System B0 mit den Winkelgeschwindigkeiten  $\underline{\omega}_{B1(B0)}$  und  $\underline{\omega}_{B2(B0)}$  drehen (Fig. 13 der eingeklammerte Index gibt an, daß die Drehungen relativ zu B0 erfolgen).

Da man vektoriell addieren darf, gilt

$$\begin{aligned} \underline{\omega}_{B2(B0)} &= \underline{\omega}_{B1(B0)} + \underline{\omega}_{B2(B1)} \\ \underline{\omega}_{B1(B0)} &= \underline{\omega}_{B2(B0)} + \underline{\omega}_{B1(B2)} \end{aligned}$$

und durch Einsetzen der ersten in die zweite Gleichung folgt

$$\underline{\omega}_{B1(B2)} = -\underline{\omega}_{B2(B1)}$$

Für die Herleitung wurde angenommen, daß alle Winkelgeschwindigkeiten im gleichen Koordinatensystem angegeben wurden, z. B. B0. Ist das nicht gewünscht, müssen die Koordinaten nach den Regeln für ortsfeste Koordinatensysteme transformiert werden, z. B.

$$\underline{\omega}_{B1(B2)}^{B0} = \underline{R}_{B2}^{B0} \underline{\omega}_{B1(B2)}^{B2}; \underline{\omega}_{B2(B1)}^{B0} = \underline{R}_{B1}^{B0} \underline{\omega}_{B2(B1)}^{B1}$$

Einsetzen und Umformen liefert

$$\begin{aligned} \underline{\omega}_{B1(B2)}^{B2} &= -(\underline{R}_{B2}^{B0})^{-1} \underline{R}_{B1}^{B0} \underline{\omega}_{B2(B1)}^{B1} = -\underline{R}_{B0}^{B2} \underline{R}_{B1}^{B0} \underline{\omega}_{B2(B1)}^{B1} \\ &= -\underline{R}_{B1}^{B2} \underline{\omega}_{B2(B1)}^{B1} \end{aligned}$$

Setzt man nun noch BA für B1 und WZ für B2, folgt

$$\underline{\omega}_{BA(WZ)}^{WZ} = -\underline{R}_{BA}^{WZ} \underline{\omega}_{WZ(BA)}^{BA}$$

oder in der abgekürzten Schreibweise des vorigen Abschnitts

$$\underline{\omega}_{BA}^{WZ} = -\underline{R}_{BA}^{WZ} \underline{\omega}_{WZ}^{BA} = -(\underline{R}_{WZ}^{BA})^{-1} \underline{\omega}_{WZ}^{BA}$$

Diese Gleichung eignet sich für eine Transformation basisbezogener in greiferbezogene Größen. Die umgekehrte Richtung erhält man entweder durch Auflösen nach  $\underline{\omega}_{WZ}^{BA}$  oder wieder durch formale Vertauschung der Indizes

$$\underline{\omega}_{WZ}^{BA} = -(\underline{R}_{BA}^{WZ})^{-1} \underline{\omega}_{BA}^{WZ}$$

## Auswertung der Überschleifkriterien

Für basisbezogene Bewegungssätze werden Beginn und Ende des Überschleifens nach folgenden Regeln bestimmt:

1. Bei PTP-CP und CP-PTP-Übergängen kommt im CP-Satz eines der bahnbezogenen Kriterien (C\_DIS, C\_ORI, C\_SPEED) und im PTP-Satz ein achsspezifisches Kriterium (C\_PTP) zur Anwendung. Überschleifbeginn und -ende sind also jeweils durch eines der Kriterien genau festgelegt.
2. In allen anderen Fällen werden die programmierten Kriterien nur auf den Beginn des Überschleifens angewendet, das Ende wird mit Hilfe einer Symmetriebedingung für Wege und Geschwindigkeiten berechnet:

$$s(\tau_1)/s(\tau_2) = v(\tau_1)/v(\tau_2)$$

( $\tau_1$  Beginn,  $\tau_2$  Ende des Überschleifens)

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß man bei LIN-LIN-Übergängen für die translatorischen Komponenten mit nur einer Überschleifparabel auskommt. Andererseits entspricht die Form des Überschleifsatzes möglicherweise nicht den Wünschen des Anwenders, da er das Ende des Überschleifens nur indirekt beeinflussen kann.

Das Überschleifen zwischen greiferbezogenen Sätzen kann grundsätzlich auf die gleiche Weise abgewickelt werden. An den Schnittstellen zu den basisbezogenen Sätzen allerdings könnte die Symmetriebedingung zur Bestimmung des Überschleif-Endes Schwierigkeiten machen. Durch den Wechsel von einem ortsfesten auf ein bewegtes Koordinatensystem und umgekehrt müssen die Randbedingungen eines der beiden Bewegungssätze transformiert werden, um die Symmetriebedingung überhaupt anwenden zu können. Dieser transformierte Satz wird unter Umständen stark verzerrt gesehen, insbesondere, wenn er Orientierungsänderungen enthält. Dadurch ist für den Anwender schwer vorhersehbar, an welcher Stelle der Überschleifvorgang endet. Insbesondere beim Überleiten auf greiferbezogene Interpolation, wo der Beginn des Überschleifens basisbezogen programmiert wird, das Ende aber noch sicher vor dem Beginn der Kontur liegen muß (Fig. 8), kann man eben dies nicht garantieren.

Die sauberste Lösung dürfte darin bestehen, das programmierte Überschleifkriterium grundsätzlich auch für die Bestimmung des Überschleif-Endes zu benutzen, wie es bei PTP-CP-Übergängen ohnehin praktiziert wird. Dies führt zu einer einheitlichen, gut überschaubaren Lösung. An der Schnittstelle zwischen basisbezogenen und greiferbezogenen Sätzen muß man außerdem davon ausgehen, daß in dem Koordinatensystem, in dem der Überschleifsatz berechnet wird, der Vorgängersatz meist wie ein Zirkularsatz aussieht. Somit muß man den Überschleifsatz sowieso aus zwei Parabeln zusammensetzen und würde von der Symmetriebedingung gar nicht mehr profitieren.

## Wechsel der Bezugssysteme in greiferbezogenen Sätzen

Durch die Interpolation der Bewegung des Basissystems relativ zum Greifer vertauschen diese Koordinatensysteme ihre Rolle vollständig, auch im Hinblick auf das Überschleifen. Im Unterschied zur basisbezogenen Bewegung ist nunmehr ein Wechsel des Basissystems BA (\$BASE) mit einer sprungförmigen Veränderung des Arbeitspunktes gleichzusetzen (wie sonst ein Wechsel von \$TOOL) und daher zwischen CP-Sätzen nicht überschleiffähig. Dagegen entspricht ein Wechsel des Greiferkoordinatensystems (gegeben durch \$TOOL) nur einer Änderung des Bezugspunktes für den nächsten Zielpunkt und beeinträchtigt das Überschleifen nicht.

Im folgenden sei der Ansatz für die Realisierung der greiferbezogenen Interpolation nochmals zusammenfassend dargestellt:

- a) der Ursprung des Greiferkoordinatensystems wird in den Tool Center Point im folgenden TCP der Roboterhand des Basiskoordinatensystems in das ortsfeste Werkzeug gelegt.
- b) Greiferbezogene kontinuierliche Bahnbewegungen, sogenannte Continuous Path-Sätze, im folgenden CP-Sätze werden greiferbezogen aufbereitet und interpoliert und der Rückwärtstransformation invertiert.
- c) Greiferbezogene Punkt-zu-Punkt-Bewegungen sogenannte PTP-Sätze werden achsspezifisch aufbereitet und interpoliert.

Liegt der Zielpunkt des PTP-Satzes in kartesischen Koordinaten vor so invertiert die Präparation den Zielpunkt und transformiert diesen in achsspezifische Koordinaten. Die achsspezifische Interpolation bleibt gegenüber der basisbezogenen Interpolation unverändert.

Der Lösungsansatz für das Überschleifverfahren basiert auf Methoden, die bereits bei der basisbezogenen Interpolation zur Anwendung kommen. Das Überschleifverfahren der basisbezogenen Interpolation stellt einen stetigen Übergang der vektoriellen Translation und Orientierungsgeschwindigkeiten zwischen Einzelsätzen sicher. Die meisten Änderungen gegenüber der basisbezogenen Interpolation entstehen in der Profilaufbereitung und zwar bei der Anpassung der Staat und Zielpunkte der Einzel- und Überschleifsätze sowie bei der Transformation der translatorischen Geschwindigkeit und der Winkelgeschwindigkeiten bei CP-CP-Übergängen.

gen.

Grundsätzlich ist der Überschleifssatz zum Koordinatensystem des Folgesatzes zu präparieren, d. h. der Wechsel zwischen basis- und greiferbezogener Interpolation erfolgt bereits zu Beginn des Überschleifens. Eine Ausnahme machen nur PTP-PTP, PTP-CP bzw. CP-PTP-Sätze, da diese achsspezifisch aufbereitet werden müssen. Im einzelnen ergeben sich Unterschiede in der Profilerzeugung gegenüber dem basisbezogenen Überschleifverfahren.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Überschleifen bei Wechsel von basisbezogener auf greiferbezogene Interpolation und umgekehrt, dadurch gekennzeichnet, daß der Ursprung eines Greiferkoordinatensystems (WZ) in die Roboterhand (Tool-Center Point, TCP), das Basiskoordinatensystem (BA) in das ortsfeste Werkzeug (W) gelegt wird, und daß greiferbezogene Verfahrenssätze greiferbezogen aufbereitet und interpoliert und vor der Transformation vom kartesischen in das Achskoordinatensystem invertiert werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1 für den Übergang von einem basisbezogen interpolierten kontinuierlichen Verfahrenssatz (Continuous Path CP) auf einen greiferbezogenen interpolierten kontinuierlichen Verfahrenssatz (CP), wobei
  - a) der Startpunkt des Folgesatzes und der Startpunkt des Überschleifssatzes in das Greiferkoordinatensystem transformiert und
  - b) der Folge- und der Überschleifssatz greiferbezogen aufbereitet werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 für den Übergang von einem basisbezogen interpolierten kontinuierlichen Verfahrenssatz (CP) auf einen greiferbezogen interpolierten linearen Verfahrenssatz (PTP), wobei
  - a) der Zielpunkt des Folgesatzes in das Basiskoordinatensystem transformiert und in achsspezifische Koordinaten umgerechnet wird,
  - b) der Folge- und Überschleifssatz achsspezifisch aufbereitet wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1 für den Übergang von einem basisbezogenen interpolierten linearen Verfahrenssatz (PTP) auf einen greiferbezogen interpolierten kontinuierlichen Verfahrenssatz (CP) wobei
  - a) der Startpunkt des Folgesatzes zunächst in das Basiskoordinatensystem und dann über eine Matrixinversion in das Greiferkoordinatensystem transformiert wird
  - b) der Folgesatz greiferbezogen aufbereitet wird.
5. Verfahren nach Anspruch 1 für den Übergang von einem basisbezogen interpolierten linearen Verfahrenssatz (PTP) auf einen greiferbezogen interpolierten linearen Verfahrenssatz (PTP), wobei
  - a) der Zielpunkt des Folgesatzes in das Basiskoordinatensystem transformiert wird und in achsspezifische Koordinaten umgerechnet wird
  - b) der Folgesatz und der Überschleifssatz basisbezogen aufbereitet werden.
6. Verfahren nach Anspruch 1 für den Übergang von einem greiferbezogen interpolierten kontinuierlichen (CP) Verfahrenssatz auf einen basisbezogen interpolierten kontinuierlichen Verfahrenssatz (CP) wobei
  - a) der Startpunkt des Folgesatzes und der Startpunkt des Überschleifssatzes in das Basiskoordinatensystem transformiert werden
  - b) der Beginn des Überschleifens durch greiferbezogene Auswertung des Überschleifkriteriums ermittelt wird
  - c) Folgesatz und Überschleifssatz basisbezogen aufbereitet werden.
7. Verfahren nach Anspruch 1 für den Übergang von einem greiferbezogen interpolierten kontinuierlichen (CP) Verfahrenssatz auf einen basisbezogen interpolierten linearen Verfahrenssatz (PTP), wobei
  - a) der Startpunkt des Folgesatzes in das Basiskoordinatensystem transformiert und in achsspezifische Koordinaten umgerechnet wird,
  - b) das Überschleifkriterium zur Bestimmung des Startpunkts des Überschleifssatzes greiferbezogen ausgewertet, die dazugehörige Position invertiert und in achsspezifische Koordinaten umgerechnet wird,
  - c) Folgesatz und Überschleifssatz achsspezifisch aufbereitet werden.
8. Verfahren nach Anspruch 1 für den Übergang von einem greiferbezogen interpolierten linearen (PTP) Verfahrenssatz auf einen basisbezogen interpolierten kontinuierlichen Verfahrenssatz (CP) wobei
  - a) der Startpunkt des basisbezogenen Folgesatzes in das Basiskoordinatensystem (BA) umgerechnet wird
  - b) der Überschleifssatz basisbezogen aufbereitet wird.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

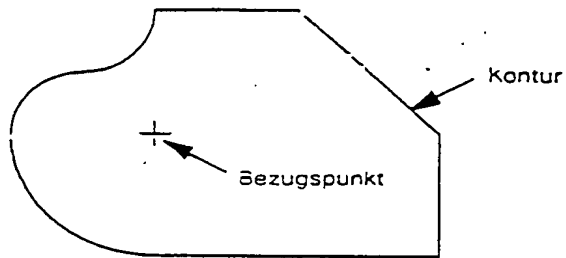


FIG 1

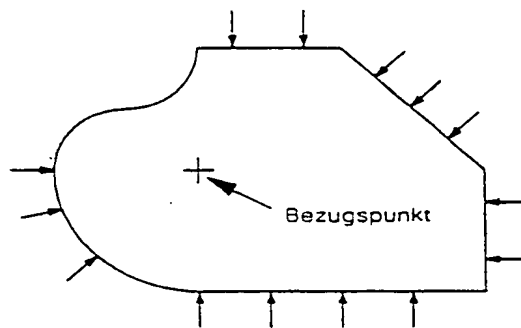
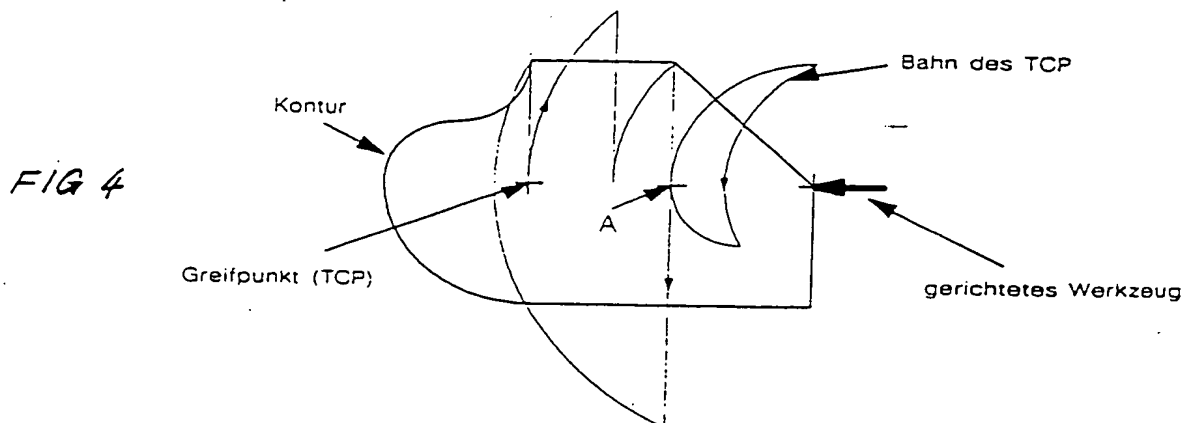
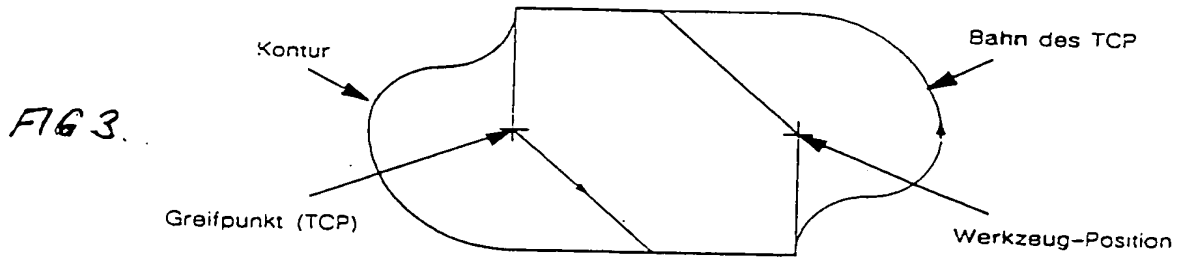


FIG 2





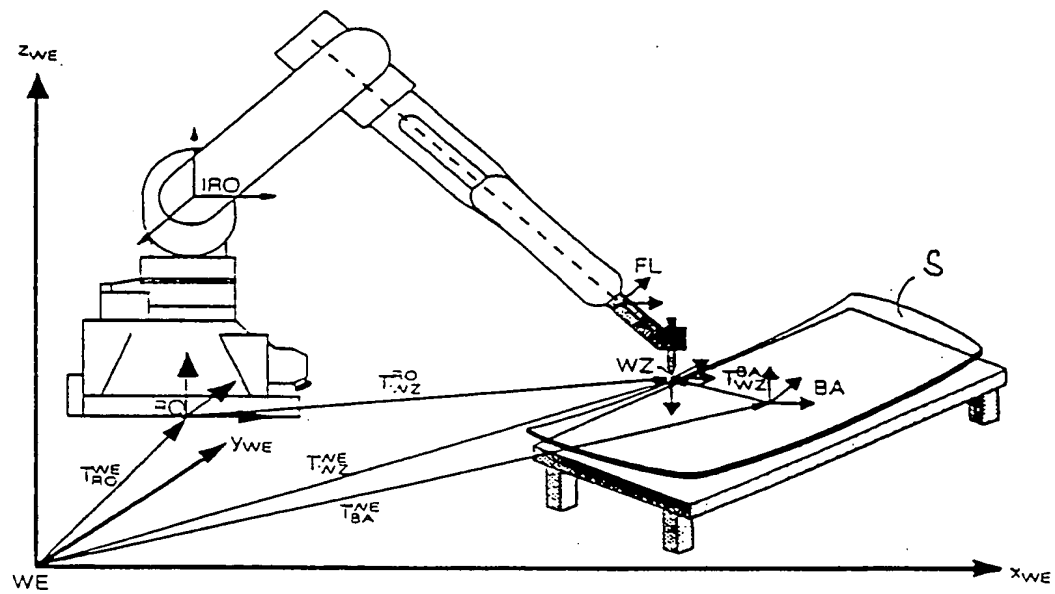


Bild 1: Führung des Werkzeugs über ein ortsfestes Werkstück

FIG 5

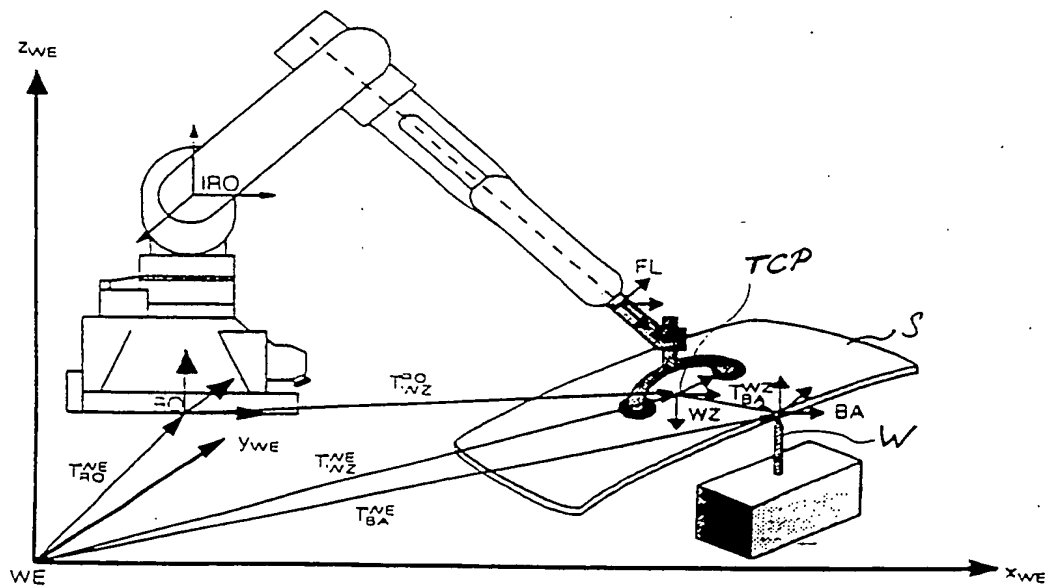


Bild 2: Führung des Werkstücks über ein ortsfestes Werkzeug

FIG 6

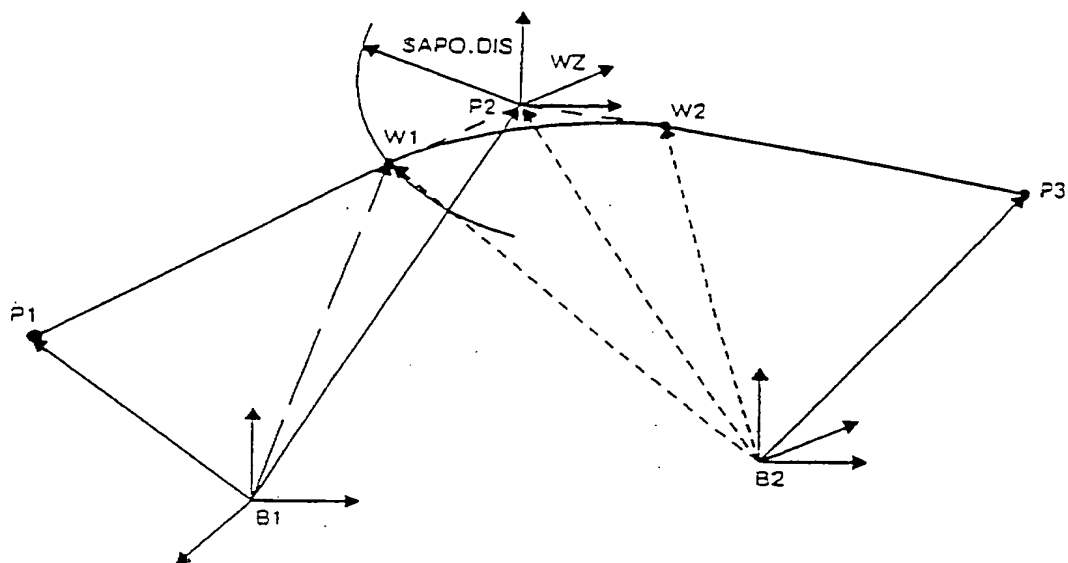


FIG 7

Bild 10: Basisbezogenes Überschleifen mit Wechsel des Bezugssystems

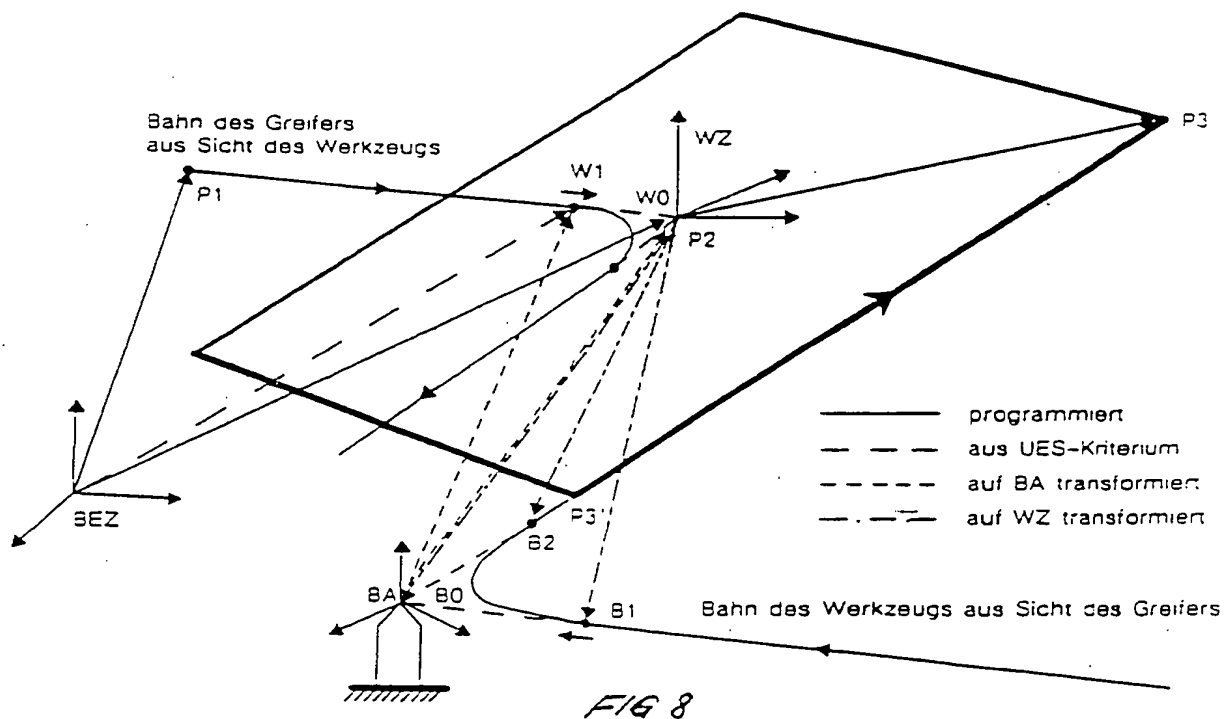
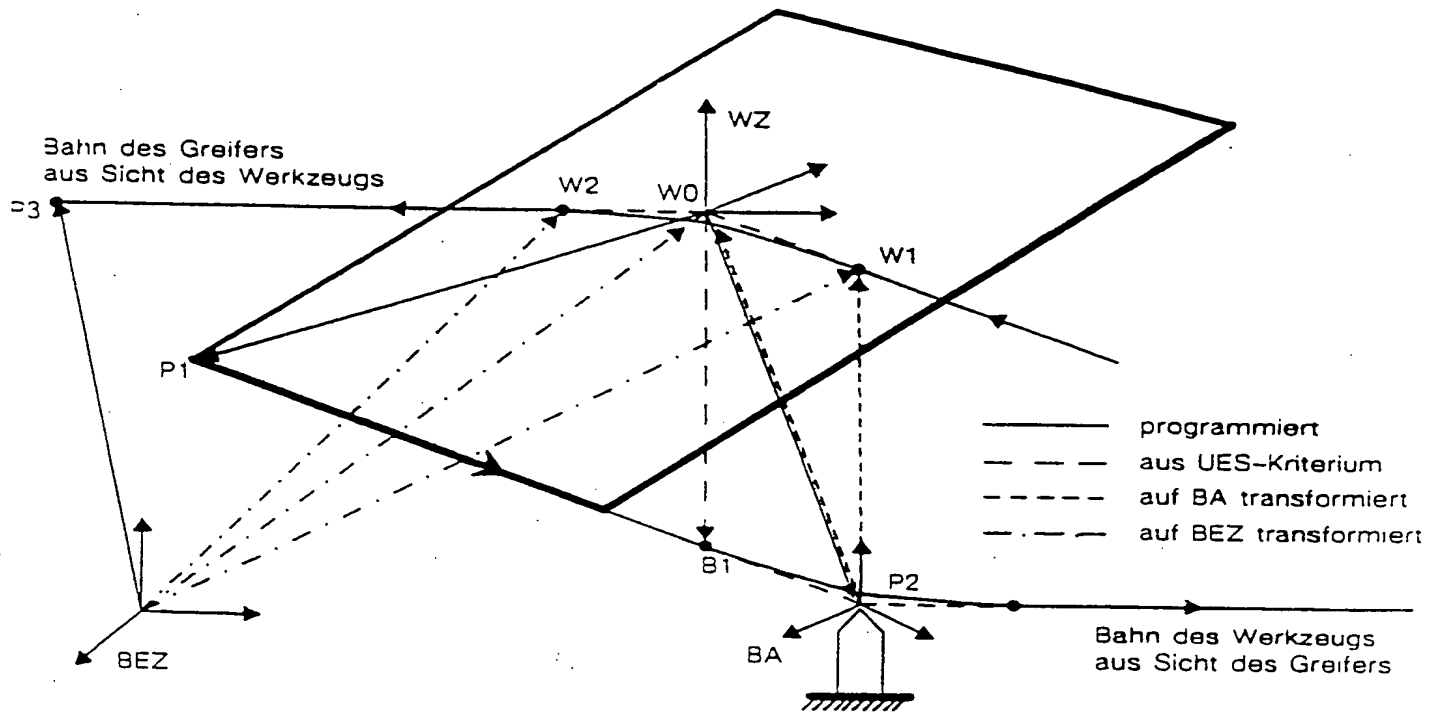


FIG 8

Bild 11: Überschleifen bei Übergang auf greiferbezogene Interpolation



**Bild 12: Überschleifen bei Übergang von greiferbezogener auf basisbezogene Interpolation**

FIG 9

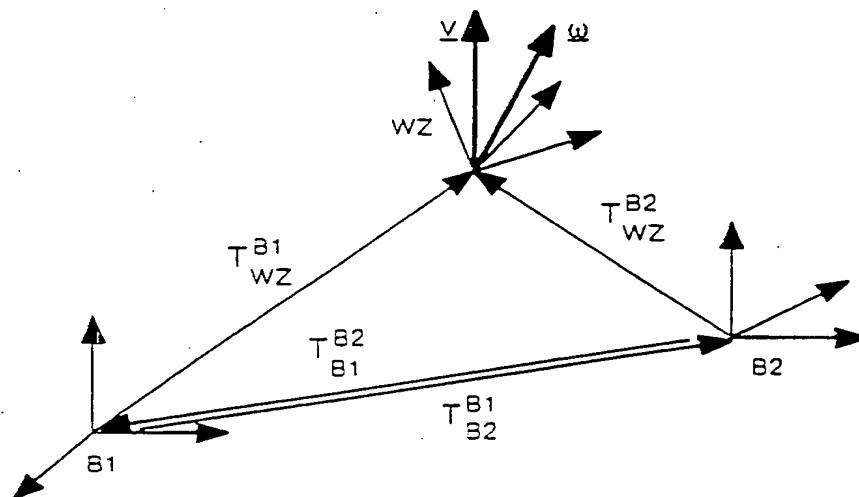


Bild 13: Transformation einer Position WZ und der Geschwindigkeitsvektoren  $\underline{v}$  und  $\underline{\omega}$  zwischen zwei Koordinatensystemen B1 und B2

FIG 10

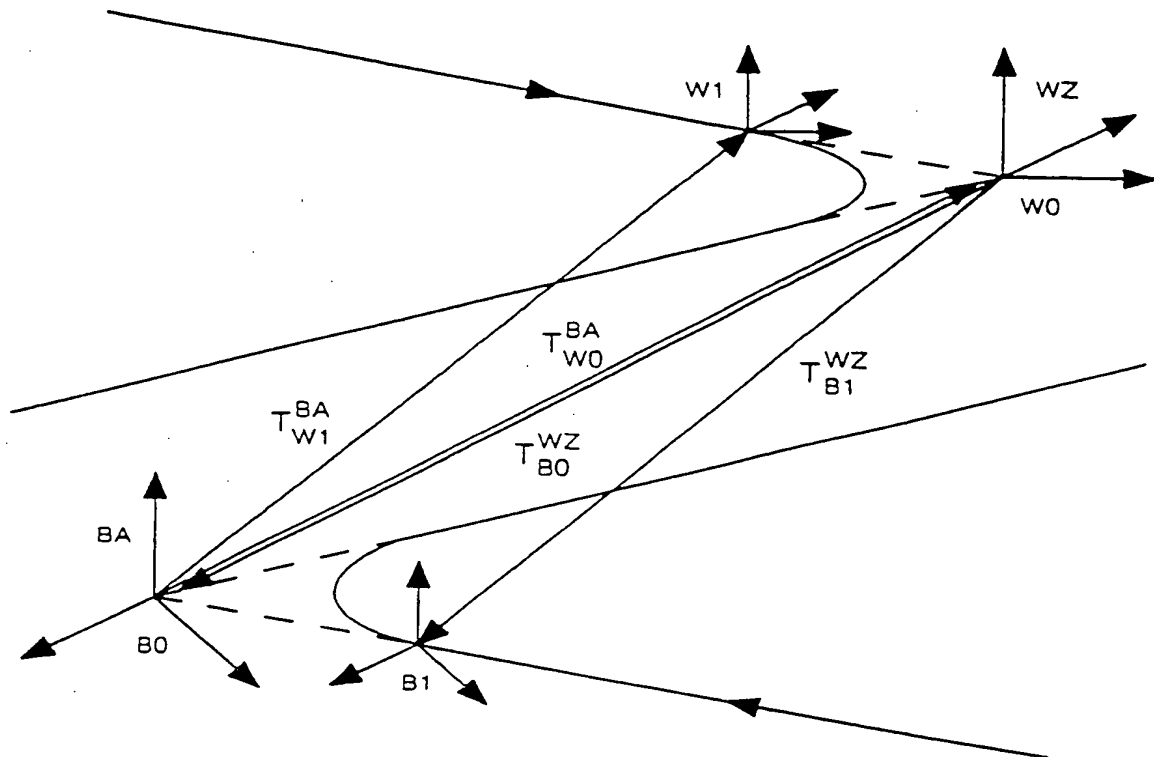


Bild 14: Transformation der Stützpunkte und Überschleifpunkte

FIG 11

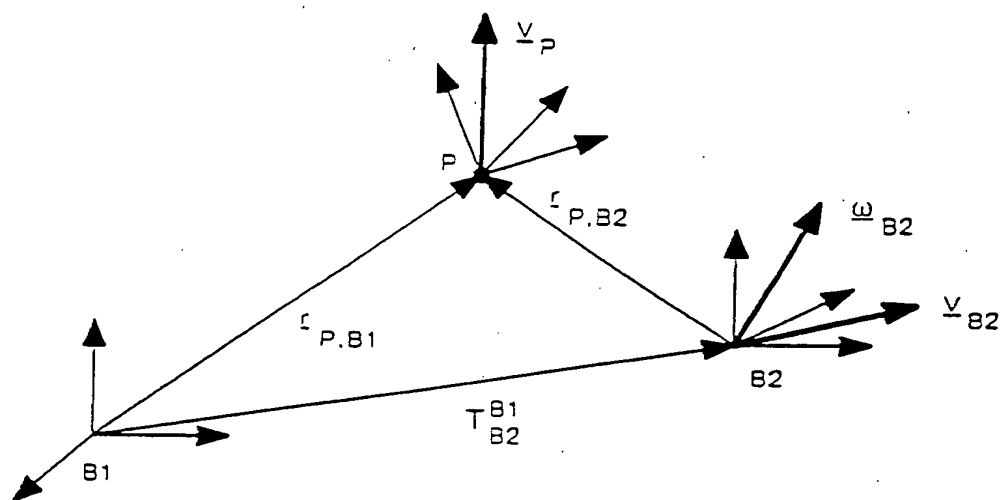


FIG 12

Bild 15: Transformation einer translatorischen Geschwindigkeit zwischen bewegten Koordinatensystemen

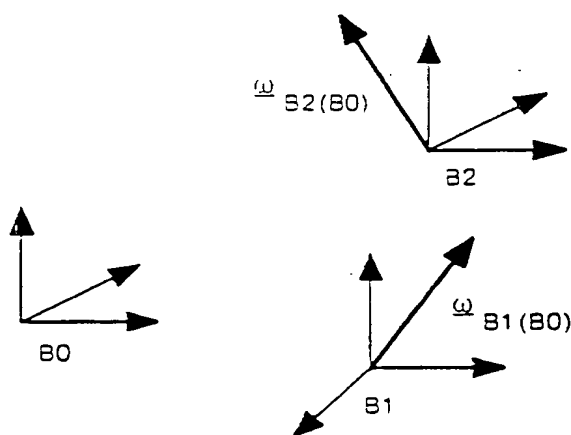


Bild 16: Transformation einer Winkelgeschwindigkeit zwischen bewegten Koordinatensystemen

FIG 13

L1 ANSWER 1 OF 1 WPINDEX COPYRIGHT 2004 THOMSON DERWENT on STN  
TI Position transformation method for numerically controlled machines -  
involves providing mathematical transformation between tool clamp and tool  
piece position to allow continuous drawn movement.  
PI DE 19507561 A1 19950914 (199542)\* 12p B25J009-18 <--  
AB DE 19507561 A UPAB: 19951026  
The method involves a change from a base reference to a tool clamp  
reference interpolation and back again. It establishes a transformation  
between a tool clamp coordinate system (WZ) in the robot hand (TCP), and a  
base coordinate system (BA) in the tool piece (W).  
Mathematical interpolation procedures are applied to the tool clamp  
reference and then inverted, before the transformation from cartesian to  
axial coordinates.  
ADVANTAGE - Permits continuous welding and gluing processes.  
Dwg.6/13